

屋上菜園を蓄熱槽に用いたビル空調システムに 関する基礎研究

大 高 敏 男*

Fundamental Study of a Green-Roof Building Air-Conditioning System with Thermal-Energy Storage Units Using Light-Weight Soil

Toshio OTAKA*

Abstract: The heat island or urban warming effect by the consumption of energy in a megalopolis would make better recognizing the importance of planting such as rooftop garden and efficient use of energy such as high efficiency building air-conditioning system. Accordingly, the author proposed a green roof building air-conditioning system using light weight soil as heat storage materials. The author have designed and developed a prototype test unit of rooftop garden as a thermal energy storage unit. The heat transfer characteristics of this unit have been evaluated. As a result, the heat transfer characteristics of the test unit have been clarified with respect to design factors such as apparent thermal diffusivity. Experiment was performed in which heat energy stored in the unit is recovered, revealing thermal storage properties of this unit. These results demonstrate that the green roof building air-conditioning system is one of the promising candidates as a new building air-conditioning system.

This paper is intended as a proposition of a green roof building air-conditioning system which is a new practical co-generation system used a thermal energy storage unit.

Keywords : Rooftop Garden, Thermal Energy Storage, Light Weight Soil, Thermal Diffusivity, Air-conditioning

1. 緒 論

近年、日本の都市部では、その近隣地域に比べて気温が数度高くなる、いわゆるヒートアイランド現象が発生し、環境問題のひとつとして関心が高まっている。ヒートアイランド現象とは、人工排熱の増加と人工被覆の増加により気温が上昇する現象をいう。都市部では、エネルギー消費が大きい、その排熱も大きい。また舗装された道路やコンクリート製の建造物といった地面の人工被覆が多い、これらがエネルギー消費による排熱の蓄熱媒体となり気温を上昇させている。特に夏季では、気温上昇により熱中症等の健康への影響が懸念され、かつエネルギー消費量がますます増加するといった悪循環も起こり大きな環境問題となっている。この問題の解決策として、都市部のアスファルトやコンクリートの地面を減らし、植物の蒸散効果も期待できる建物の屋上緑化が注目されており、種々の緑化ユニットが実用化されている。屋上緑化はヒートアイランド現象抑止の他にも、建造物の寿命延長や、建築物の断熱効果による冷暖房負荷の軽減といった省エネルギー効果も期待できる。

一方、大きな地球環境問題のひとつに地球温暖化が挙げられる。地球温暖化を抑止するためには、発電所の負荷を減らす必要があり、電化製品のエネルギー効率を高める事も重要な施策のひとつである。特にビル用空調機器のエネルギー効率は家庭用空調機器に比べて低く、今後早急に改善されなければならない。

このような背景から、著者らは屋上緑化システムとビル空調システムとの融合システムを考え、基礎研究を進めている¹⁾。本学は、東京都の中心に立地している工学研究機関として、首都圏における環境問題に率先して積極的に取り組むべきであり、こうした取り組みは地球環境技術や省エネルギー技術を継承する技術者育成に繋がるため、学生への教育にも良い影響を与えるものと信ずる。

現在のビル空調システムには、余剰な熱負荷が多く、屋上緑化ユニットを蓄熱槽に利用すれば、エネルギーの有効活用が可能な省エネルギー型ビル空調システムの構築が可能である。しかし、屋上緑化ユニットとビル空調システムを融合させた空調システムはこれまでの所見あたらない。屋上緑化ユニットを蓄熱槽として利用し、補助熱源装置を組み込んだビル空調システムと融合させることにより省エネルギーな新空調システムを構築でき、

*1 国土館大学理工学部理工学科機械工学系

地球温暖化とヒートアイランド現象の両方を同時に解決する技術となる可能性がある。

本報では、緑化ユニットに用いる軽量土として一般に用いられているフェノール発泡樹脂と、有機材料であるココナツ皮材について、見かけ熱拡散率を実験により評価した。また、蓄熱槽に蓄熱された熱の回収実験を行い、蓄熱特性を明らかにした。その結果、空調システムの蓄熱槽として活用可能であることが明らかになったので報告する。さらに、ひとつの試みとして本システムを仮想的にコ・ジェネレーションシステムに組み込んだ場合のエネルギー収支を概略見積もりすることにより、応用化への課題を展望する。

2. 理論解析

菜園に用いるプランターに充填する軽量土は、多孔質体であり、実際の熱拡散率が不明である。ここでは、軽量土を空気と水分が均一に混ぜられた均一個体と見なし熱拡散率を実験と解析により把握することにした。こうして求められる熱拡散率は、軽量土の物質の物性値とは異なるので、見かけ熱拡散率と定義し物性値と区別する。見かけ熱拡散率は、蓄熱槽の熱設計や集熱性能評価に用いることができる。

プランターの蓄熱槽の伝熱解析は、蓄熱槽を深さ方向の1次元の半無限土壌と仮定し、放射の影響、空気の対流の影響は小さいものとして無視し含めないことにし、定常周期熱伝導問題として求解することとする。

[F.E.]

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}$$

[B.C.]

$$v = A \sin(\omega t + \varphi) \quad \text{at } x = 0$$

よって、解は次のようになる。

$$v = A_0 e^{-\kappa x} \sin(\omega t + \varphi - \kappa x) + v_0$$

$$k = \sqrt{\frac{\omega}{2a}}$$

v : 温度 [K], v_0 : 初期温度 [K]

x : 蓄熱槽の深さ [m]

ω : 温度波の角速度 [rad/s]

φ : 位相角 [rad.]

t : 時間 [s]

κ : 見かけ熱拡散率 [m^2/s]

A_0 : 温度振幅 [K]

3. モデル実験

3.1 モデル実験装置の概要

Fig. 1 に、実験に使用したモデル実験装置の構造を示す。太陽の代わりにハロゲンライトを用い、土壌表面から 700 [mm] の位置に設置した。ハロゲンライトの印加電圧は自由に变化できるようにしてあり、光量と熱量を

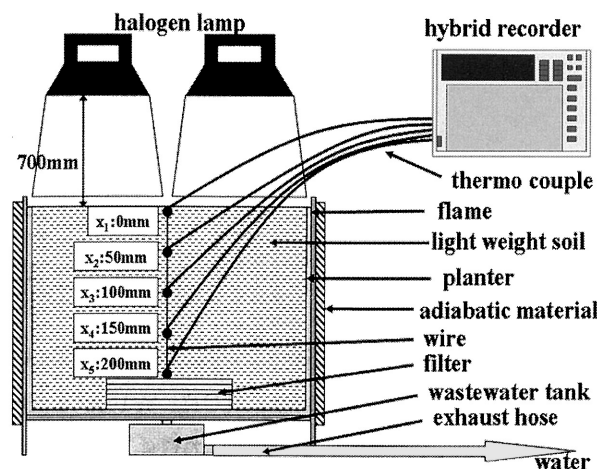


Fig. 1 Model experiment system



Fig. 2 Model experiment system

調整できるようになっている。緑化ユニットは、底部に排水口を設け、余剰の水を逐次排水できるようになっている。また、地中には地表面から地中深さ方向に、0m, 0.05m, 0.10m, 0.15m, 0.20m の位置に熱電対を埋設し、地中の各深さにおける温度が測定できるようになっている。緑化ユニット側面は断熱材を設置しており、外気と断熱されている。底面は 0.30m において熱流束の深さ方向の変化がほとんど見られないことから、この深さを無限遠と見なし解析を進めることとした。また、Fig. 2 に示すように、実験装置の底部には銅管を設置しており、管内には一定流量一定温度の水が連続通水できるようになっている。銅管の入口と出口の温度と流量を計測することにより、銅管内に流れる水と軽量土との間の移動熱量を計測できるようにしている。

3.2 軽量土の概要

一般に屋上緑化に用いられる土は建築物の過重負荷を避ける必要があり、日本では法令により軽量土が用いられている。ここでは、Fig. 3 に示すフェノール発泡樹脂

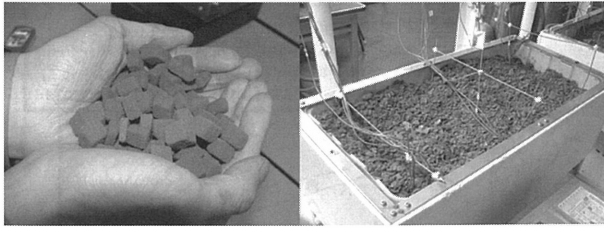


Fig. 3 Phenol forming resin

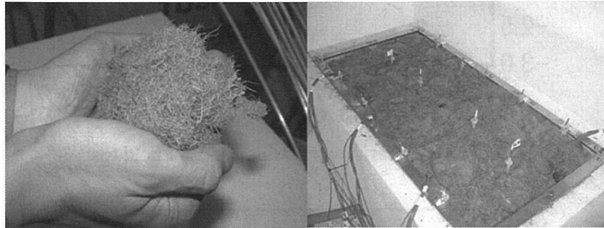


Fig. 4 Coconut bark based material

Table 1 Water retention rates of soil

	Mass [kg] $\times 10^{-3}$		Water retention rate [%]
	wet	dry	
Normal Compost	100	48.9	51.1
Phenol foaming resin	100	30.9	69.1
Coconut bark based material	100	73.9	26.1

と、Fig. 4 に示すようなココナツ皮材を用いた。どちらも保水性に優れており、また多孔性があるため、緑化ユニットに設置したときに水の他に空気も多く含む土壌を構成することができる。Table 1 に、軽量土に水分を含ませた後十分に時間がたったときの保水率を示す。一般培養土よりもフェノール発泡樹脂は保水率が高く、またココナツ皮材は低くなっている。ココナツ皮材の方がフェノール発泡樹脂よりも水はけが良く乾燥しやすい土壌である。

3.3 実験方法

実験は、まず、銅管内に通水しない状態で、土壌に十分に水分を含ませた後、ハロゲンライトを土壌に 12 時間照射、12 時間停止の動作を繰り返し 3 日間行い、その時の土壌の温度を 20 分おきに記録した。土壌の表面温度の変化を正弦波とみなし、また側面を断熱することにより土壌深さ方向の 1 次元熱流れとし、深さ方向に対する温度振幅の減衰比を測定し、見かけ熱拡散率を算出する。次に、銅管に通水した状態で、ハロゲンライトを照射する実験を行った。ハロゲンライトの照射は、12 時間を 1 周期として 20 分おきに電圧を変化させ、照射強度を変化させた。そのときの水が得る熱量の応答を記録した。ハロゲンライトは消費電力を電力計にて測定して記録するようにし、この消費電力を軽量土に供給され

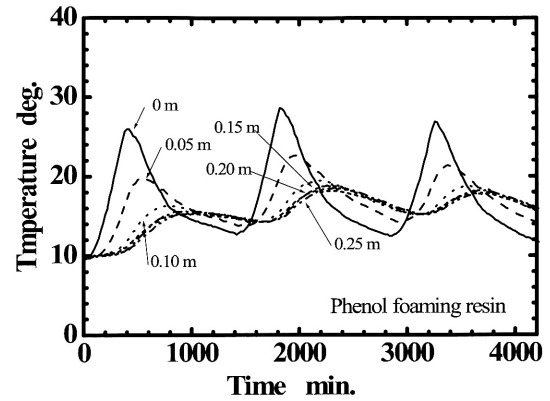


Fig. 5 Temperature responses

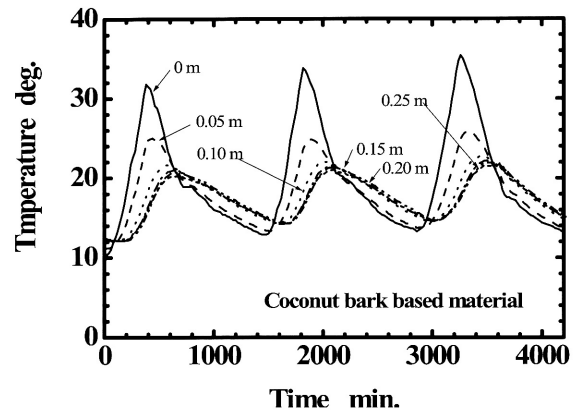


Fig. 6 Temperature responses

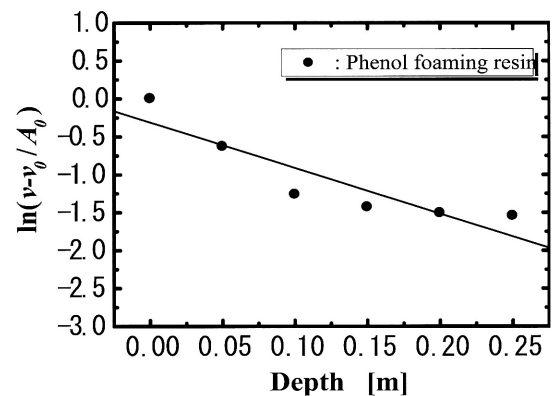


Fig. 7 Temperature amplitude ratios

る熱量とした。

尚、モデル実験装置は日射が当たらない室内にて無風の状態で行い、日射による影響と対流の影響を含めないこととする。

4. 実験結果

フェノール発泡樹脂を用いた緑化ユニットの土壌の各時間における温度応答を Fig. 5、ココナツ皮材を用いた場合を同様に Fig. 6 に示す。どちらも土壌表面温度はほぼ正弦波を示しており、また土壌の深さが深くなると温度振幅が減衰しかつ位相が遅れている。これらの図より、それぞれの温度振幅の減衰を土壌の深さに整理し

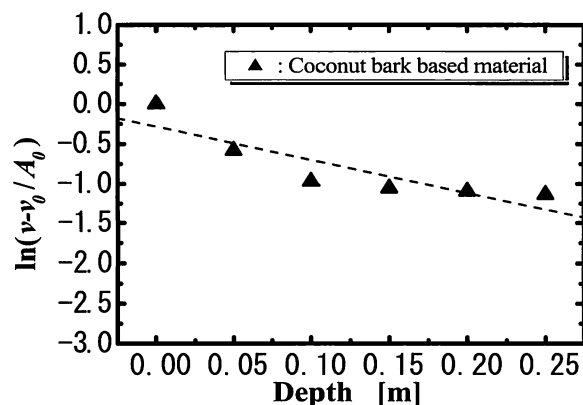


Fig. 8 Temperature amplitude ratios

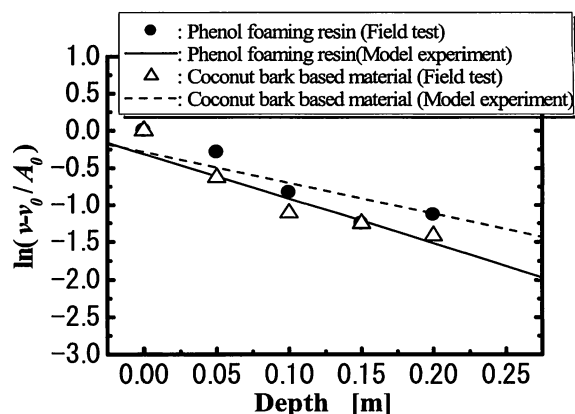


Fig. 9 Temperature amplitude ratios of field test

Table 2 Apparent thermal diffusivity

Soil	Apparent thermal diffusivity [m ² /s] × 10 ⁻⁶
Phenol foaming	2.09
Coconut bark based material	0.16
Normal Compost	0.25
Water	0.15
Concrete	0.57

Fig. 7, Fig. 8 に示す。図中の直線は、データを線形近似したもので、この傾きから見かけ熱拡散率が求められる。深さ 0.10~0.15m 近傍で傾向が変わっているが、これは、軽量土は多孔質体であり、水や空気が混入しているため、表面近傍に対して 0.10~0.15m より深いところでは一定の水分と空気がいつも存在しているためである。

Table 2 は、それぞれの土壌の見かけ熱拡散率を示す。参考のために代表として水、コンクリート、土壌の一般的な熱拡散率を併せて示した。フェノール発泡樹脂の軽量土の見かけ熱拡散率は、水や土壌に比べて大きい値となっている。これは、軽量土に多く含まれている空気の影響によるものと考えられる。屋上緑化ユニットは施行の容易性や総重量の軽減化の観点から薄層構造が求められる事が多いが、軽量土の見かけ熱拡散率が大きいことは、薄層構造でもビルの断熱効果が期待できかつ土壌の温度応答が良好である事を意味している。フェノール発泡樹脂とココナッツ皮材を比べると、見かけ熱拡散率が大きいフェノール発泡樹脂の方がココナッツの皮材よりも本システムの土壌に適すと考えられる。植物栽培の観点からは保水率が高いフェノール発泡樹脂のほうが適しているが、有機廃資源の活用の観点、設置後の外観上の観点なども考慮し、これらの混合軽量土も今後検討する必要があるだろう。

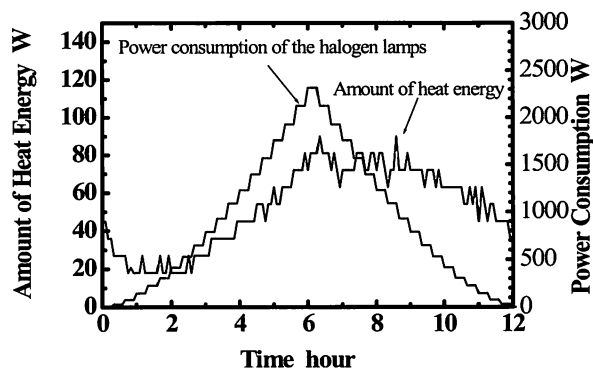


Fig. 10 Amount of heat energy

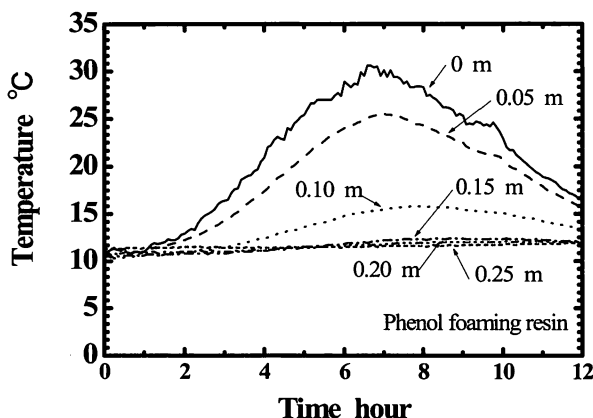


Fig. 11 Temperature responses

次に、実際の屋外にて同様に実験を行い、モデル実験の結果と比較した。Fig. 9 に温度振幅の減衰比と土壌深さの関係をモデル実験装置の結果と比較して示す。図よりフィールド試験とモデル実験との間に若干の誤差があるが、概ね同じ傾向であることがわかった。誤差の原因は、フィールド試験における土壌表面温度の変化を正弦波と見なし解析を行っているため、モデル実験のように土壌表面温度を正弦波に近くなるように制御することができないためである。

次に、銅管に通水し、ハロゲンライトの電圧を1周期12時間で20分おきに周期変化させ、これを繰り返したときのハロゲンライトの消費電力と水が得た熱量

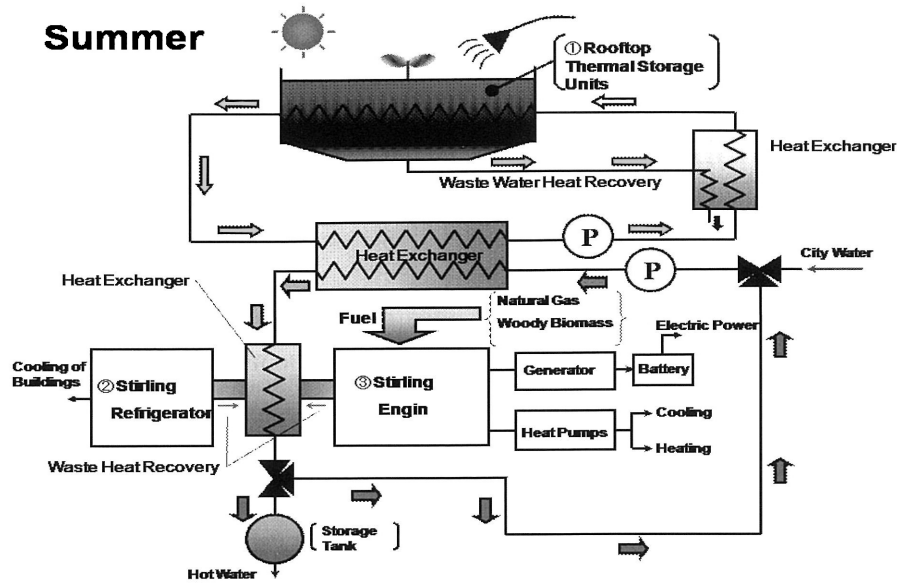


Fig. 12 Expected co-generation systems (Summer mode)

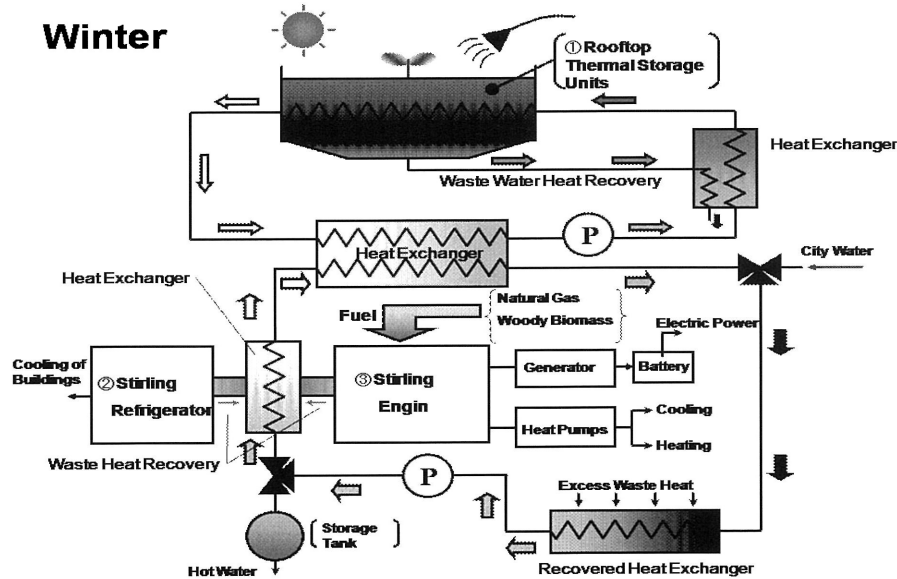


Fig. 13 Expected co-generation systems (Winter mode)

を Fig. 10 に示す。水の受熱量の変化はハロゲンライトの消費電力より約 1.5 時間の位相遅れで周期変化している。この伝熱応答速度は 1 日単位で負荷変動する空調用途に十分応用可能である。また、ハロゲンライトの最大消費電力の約 25% が水により回収されることが明らかになった。また、Fig. 11 にこのときの土壌の温度応答を示す。図は、実験誤差を含むものの準定常周期熱伝導とみなせる実験開始から 3 周期のところについて示した。銅管を埋設している深さ 0.15m より深いところではほとんど温度振幅はなくなっており、0.15m に埋設した銅管により概ね良好に集熱することができた。

5. ビル用コ・ジェネレーションシステム

屋上緑化ユニットを空調用の蓄熱ユニットとして活用すると、省エネルギー型のビル用空調システムを構築す

ることが可能である。冬期においてもビル内の余剰排熱を緑化ユニットへ供給することにより冬枯れせずに年間を通じて緑化が可能となる。屋上緑化により、ビルの断熱性が向上するため空調のエネルギー効率が向上する。また太陽熱エネルギーによる給湯が利用可能となる。Fig. 12, Fig. 13 に屋上緑化ユニットを用いたビル用コ・ジェネレーションシステムを示す。Fig. 12 は夏季の使用を想定した形態で、Fig. 13 は冬季の使用を想定した形態である。

Fig. 12 のエネルギー回収順序は以下ようになる。

- (1) 屋上に設置された〔①屋上緑化蓄熱ユニット〕により植物の栽培を行うことで、ビル壁温を低下させるとともに CO₂ 排出量を減少させ、地中に配した熱交換器内部にポンプで水を循環させ、温水を得る。同時に軽量土から出る排水の熱も熱交換

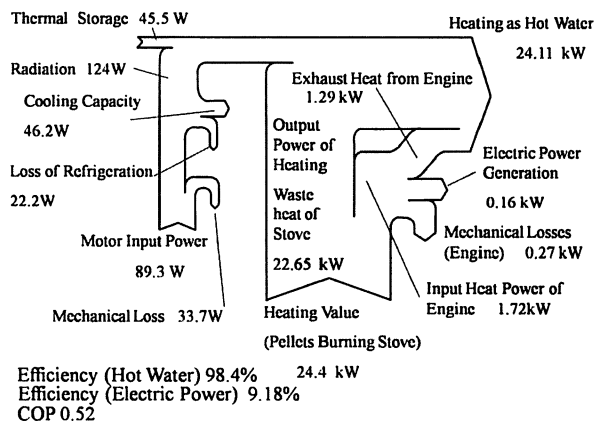


Fig. 14 Heat balance (Summer mode)

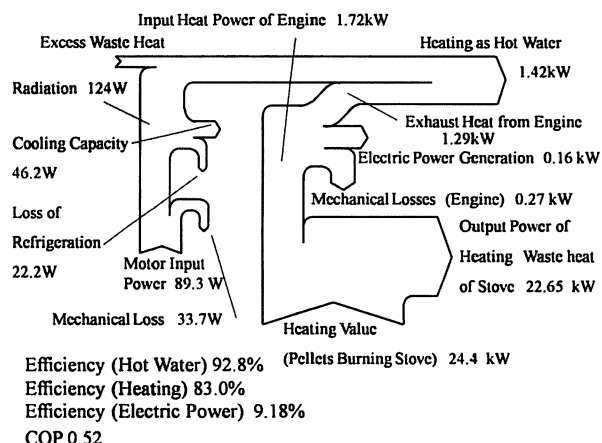


Fig. 15 Heat balance (Winter mode)

器に回収させる。得られた温水は熱交換器を介してビル内部に送られる。

- (2) ビル内部では冷房,あるいは冷蔵庫用に〔②スターリング冷凍機²⁾〕が運転されている。その際,冷凍機の高温側熱交換器から出る排熱を,(1)で得られた温水に加える。
- (3) ビル内部では電力需要のための発電や,ヒートポンプ駆動用の動力を得るため,木質バイオマスペレットストーブを使用した〔③スターリングエンジン〕の運転も行われている。ストーブの排熱,廃棄ガスの熱,並びにエンジンの低温側熱交換器から出る排熱などを(2)で得られた温水に加える。
- (4) (3)で得られた温水をビル下層(例えば地下)の貯湯タンクに回収し,ビル内部の給湯に利用する。同様に Fig. 13 のエネルギー回収順序は以下のようになる。

- (1) 暖房等の余剰排熱を熱交換器で回収し,温水を得る。
- (2) ビル内部では冷蔵庫用に〔②スターリング冷凍機〕が運転されている。その際,冷凍機の高温側熱交換器から出る排熱を,(1)で得られた温水に加える。
- (3) ビル内部では暖房のため,木質バイオマスペレットストーブが運転されており,その排熱を利用して〔③スターリングエンジン〕が電力需要のために運転されている。このエンジンの低温側熱交換器から出る排熱を(2)で得られた温水に加える。
- (4) (3)で得られた温水は,ポンプによって屋上に設置された〔①屋上緑化蓄熱ユニット〕地中の熱交換器に送られる。これにより軽量土が暖められて冬期のおいても植物の発育を助け,CO₂排出量を減少させることができる。

次にビル用コ・ジェネレーションシステムのシステム効率の試算を行い,システム効率の概略試算を行った。

この結果を Fig. 14, Fig. 15 に示す。ここで Fig. 14 は Fig. 12 に対応し, Fig. 15 は Fig. 13 に対応する。

Fig. 14 より,蓄熱量 45.5 W,モータ入力 89.3 W,ペレットストーブ発熱量 24.4 kW に対して,冷凍能力 46.2 W,発電出力 0.16 kW,給湯熱量 24.11 kW が得られていることがわかる。この運用形態では,給湯効率 98.4%,発電効率 9.18%, COP 0.52 である。

Fig. 15 でも図 (a) と同様の入力に対して,冷凍能力 46.2 W,発電出力 0.16 kW,暖房出力 22.65 kW,給湯熱量 1.42 kW が得られていることがわかる。この運用形態では暖房効率 92.8%,給湯効率 83.0%,発電効率 9.18%, COP 0.52 であり, Fig. 14, Fig. 15 のいずれもシステム全体の効率は高い。また,本システムは高効率であるだけでなく,構成要素全てが低環境負荷であるため(スターリング冷凍機は自然冷媒を用いるためオゾン層破壊や地球温暖化を引き起こさない,ペレットストーブを用いたスターリングエンジンは排気ガスがクリーンで CO₂ の抑制にも効果がある,屋上緑化蓄熱ユニットはヒートアイランド現象の対策や地球温暖化防止にも役立つ。),地球環境に優しいエネルギー回収システムであるといえる。

6. 結 論

緑化ユニットに用いる軽量土として,フェノール発泡樹脂とココナツ皮材について見かけ熱拡散率をモデル実験装置により評価した。その結果,一般的な植物培養土よりも大きな見かけ熱拡散率を有していることが明らかになった。また,フィールド試験によりモデル実験結果が実際の屋外の緑化ユニットの状態を模擬できていることを確認した。また,蓄熱槽に埋設した銅管に通水することにより熱回収を行い,伝熱評価を行った。これらのことから,ビル空調システムと融合した屋上緑化システムの蓄熱槽として有効に活用できる可能性があることが明らかになった。さらに,屋上緑化ユニットを蓄熱槽として利用するビル用コ・ジェネレーションシステムを

提案し、システム効率を試算することにより有用性を明らかにした。

以下に得られた内容を示す。

- (1) フェノール発泡樹脂の見かけ熱拡散率は、 $2.09 \times 10^{-6} [\text{m}^2/\text{s}]$ であった。(ただし、保水率 69.1%, 植物を植えていない状態)
- (2) ココナッツ皮材の見かけ熱拡散率は、0.16であった。(ただし、保水率 26.1%, 植物を植えていない状態)
- (3) 12 時間周期で蓄熱槽への供給熱量を変化させたときの水による伝熱応答は約 1.5 時間遅れであり、供給熱量の約 25%が回収可能であった。

参考文献

- 1) T.Otaka, K Nagata, Performances of Thermal Energy Storage Unit using Light Weight Soil for a Green Roof Building Air-conditioning System, Proc. The 3ed Asian Conference on Refrigeration and Air-conditioning, (2006), pp. 87-90
- 2) T.Otaka, I KODAMA, M OTA, Experimental Study on a Stirling Cycle Machine of 100W Design Capacity, Journal of Power and Energy Systems, Vol. 2, No. 3, (2008) pp. 1027-1035